

## Orbit Satelit-Satelit Galaksi Bima Sakti melalui Tinjauan Data Kinematik

Wildan Hidayat<sup>1\*</sup>, Rendy Darma<sup>1</sup>, dan Mochamad Iqbal Arifyanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganeca 10 Bandung 40132, Indonesia

<sup>2</sup>Kelompok Keahlian Astronomi dan Observatorium Bosscha, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganeca 10 Bandung 40132, Indonesia

\* Corresponding author. E-mail: wilhid@gmail.com  
hp: +62-822-19104694

### ABSTRAK

Grup lokal mengandung lebih dari 60 galaksi di dalamnya, salah satunya adalah Bimasakti. Galaksi ini dikelilingi oleh galaksi-galaksi berukuran kecil yang disebut sebagai satelit Bimasakti. Sampai saat ini, ditemukan sekitar 40 satelit Bimasakti hingga radius 400 kpc dari Bimasakti. Dalam pekerjaan ini, dilakukan simulasi numerik perhitungan orbit untuk 31 satelit Bimasakti dengan menggunakan parameter kinematika yang lengkap dari berbagai referensi. Perhitungan ini bertujuan untuk mempelajari dinamika orbit satelit-satelit Bimasakti. Analisis kecepatan orbit satelit terhadap kecepatan lepas Bimasakti menunjukkan bahwa semua satelit sebenarnya terikat secara gravitasi dengan Bimasakti. Namun, sebagian satelit memiliki jarak apogalaktik di luar radius virial Bima Sakti (282,46 kpc) yang menunjukkan bahwa satelit-satelit ini sedang mengalami *backsplashing*. Beberapa satelit memiliki jarak *pericenter* kurang dari 20 kpc dari Bimasakti, seperti Sagittarius, Draco II, Tucana III, dan Segue 1. Satelit-satelit ini diperkirakan sedang mengalami gangguan yang disebut *tidal stripping*.

**Kata kunci:** Bimasakti, satelit galaksi, parameter orbit

### ABSTRACT

The local group contains more than 60 galaxies, one of them is the Milky Way galaxy. Our galaxy surrounded by smaller galaxies called, Milky Way's satellite. In this work, we perform the numerical simulation for calculating the orbit of 31 Milky Way's satellites using completed kinematic parameters from several publications. This work focused on understanding the dynamics of Milky Way's satellite. The analysis of satellites velocity orbit compares to the escape velocity of our galaxy shown that all of the satellites gravitationally bound. Meanwhile, the apogalactic distance of a number of satellites lay in the outer region of virial radii of Milky Way (282,46 kpc). It means that the satellites experience the blacksplashing process. Besides that, other satellites (Sagittarius, Draco II, Tucana III, and Segue 1), undergo the tidal stripping process due to the perigalactic distance for each galaxy less than 20 kpc.

**Keywords:** Milky Way; Galaxy Satellite; The orbit parameter

### 1. Pendahuluan

Galaksi Bima Sakti, Andromeda, dan galaksi-galaksi lainnya berada dalam suatu kelompok gugus yang disebut sebagaigrup lokal. Terdapat lebih dari 60 galaksi yang terletak pada grup lokal [1]. Ukuran dan jarak dari masing-masing galaksi terhadap Bima

Sakti sangat beragam. Objek-objek tersebut dapat bergerak mengorbit Bima Sakti pada jarak tertentu sehingga seringkali disebut sebagai satelit Bima Sakti. Satelit galaksi yang mengorbit Bima Sakti dengan batasan radius virial ( $r_{vir}$ )  $\sim 300kpc$ , berjumlah lebih dari 40 buah [2].

Pembentukan dan evolusi grup lokal dapat dipelajari melalui pengamatan parameter intrinsik atau orbit satelit Bima Sakti (8). Parameter orbit satelit Bima Sakti dapat membantu menjelaskan apakah perubahan parameter intrinsik satelit dipengaruhi oleh dinamika dalam dirinya sendiri atau adanya efek dari luar satelit tersebut. Salah satu efek tersebut adalah pengaruh gaya pasang surut satelit–galaksi utama atau satelit–satelit. Gaya pasang surut pada satelit galaksi dapat menyebabkan distribusi spasial satelit ini tersebar, contohnya adalah distribusi spasial Carina I (6).

Pada pekerjaan ini akan ditentukan distribusi jarak satelit-satelit galaksi terhadap pusat Bima Sakti. Kemudian dilakukan perbandingan kecepatan 3D satelit galaksi dengan kecepatan lepas Bima Sakti. Serta dilakukan juga distribusi *apocenter* dan *pericenter* dari seluruh satelit. Diharapkan hal tersebut dapat menunjukkan hubungan satelit galaksi dengan Bima Sakti dalam satu sistem yang terikat secara gravitasi.

Pada bagian 2 dijelaskan mengenai data kinematik satelit galaksi yang digunakan. Kemudian data ini menjadi nilai awal untuk simulasi numerik yang dilakukan. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui perubahan orbit satelit galaksi dalam kurun waktu 13 Gyr setelah pembentukan Bimasakti. Selanjutnya, didapatkan hasil simulasi yang dijelaskan pada bagian 3. Setelah dilakukan analisis, didapatkan kesimpulan yang menjawab tujuan dari pekerjaan ini.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1. Bahan

Penentuan parameter kinematik dan posisi satelit Bima Sakti tidaklah mudah. Hal ini disebabkan oleh kecerlangan yang rendah dari satelit-satelit tersebut. Diperlukan teleskop survei dengan ketelitian yang baik untuk dapat mendeteksi keberadaan benda redup sebagai akibat dari jaraknya yang sangat jauh. Saat ini, salah satu survei yang dapat diandalkan dalam penentuan kinematik bintang adalah survei yang dilakukan oleh *Hubble Space Telescope* (HST) dan GAIA.

Pada penelitian ini, didapatkan data parameter kinematik dan posisi bintang-bintang

anggota satelit Bimasakti dari berbagai penelitian dan misi pengamatan. Parameter yang diperlukan terdiri dari posisi pada koordinat ekuatorial ( $\alpha, \delta$ ), jarak ( $d$ ), gerak diri ( $\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta$ ), dan kecepatan radial ( $V_r$ ) beserta dengan ketidakpastian dari masing-masing parameter tersebut. Total satelit galaksi yang terkumpul sebanyak 31 galaksi, disajikan pada Tabel 1.

Data kinematik Sagittarius, LMC, SMC, Draco, Ursa Minor, Sculptor, Sextans, Carina, Fornax, Leo II, Leo I mengacu pada (4) dan referensi di dalamnya. Untuk Aquarius II, data posisi, jarak, dan kecepatan radial didapatkan dari (13). Sedangkan data gerak diri didapatkan dari (9).

Data posisi dan jarak untuk satelit Crater II mengacu pada (13). Nilai kecepatan radial diadopsi dari (13) dan (7). Sedangkan gerak diri didapatkan dari (11). Untuk satelit Grus I, nilai posisi dan jarak satelit ke Matahari diadopsi dari (10). Gerak diri didapatkan dari (9) dan nilai kecepatan radial berasal dari dari (10) dan Walker dkk. (14).

Data posisi dan kinematik untuk satelit-satelit lainnya, yaitu Triangulum I, Segue 2, Hydrus I, Horologium I, Reticulum II, Carina II, Carina III, Ursa Major II, Segue 1, Ursa Major I, Willman I, Coma Berenices, Bootes II, Bootes I, Draco II, Tucana II, Tucana III mengacu pada (12) dan referensi di dalamnya.

### 2.2. Metode

Perhitungan orbit satelit Bima Sakti dilakukan melalui simulasi numerik. Pada simulasi ini, dilakukan penurunan persamaan potensial gravitasi Bima Sakti untuk mendapatkan persamaan gerak berupa percepatan. Dari persamaan gerak tersebut, dapat dihitung posisi dan kecepatan satelit galaksi pada setiap waktu. Perhitungan posisi dan kecepatan tiap waktu ini akan menunjukkan orbit satelit galaksi dalam mengelilingi Bima Sakti. Tahapan perhitungan orbit ini secara keseluruhan disebut sebagai integrasi orbit.

Model potensial galaksi Bima Sakti yang digunakan pada penelitian ini mengadopsi model potensial sumbu simetris yang didefinisikan pada (3). Model ini terdiri dari tiga bagian yaitu potensial *bulge*, piringan, dan

halo dark matter. Potensial bulge dan piringan Bima Sakti menggunakan persamaan potensial (Miyamoto & Nagai, 1975), seperti ditunjukkan pada persamaan (1). Sedangkan potensial halo dark matter mengikuti (Navarro, dkk 1997), seperti ditunjukkan pada persamaan (2). Penjumlahan dari ketiga model potensial tersebut akan merepresentasikan model potensial Bima Sakti, lihat persamaan (3).

$$\Phi_b(R, z) = \Phi_d(R, z) = -\frac{M}{\sqrt{R^2 + (a + \sqrt{z^2 + b^2})^2}} \quad (1)$$

$$\Phi_h(r) = -\frac{M_h}{r} \ln\left(1 + \frac{r}{a_h}\right) \quad (2)$$

$$\Phi_{MW} = \Phi_b(R, z) + \Phi_d(R, z) + \Phi_h(r) \quad (3)$$

Koordinat kartesian digunakan pada potensial gravitasi Bima Sakti, dengan pusat koordinat adalah pusat Bima Sakti. Sehingga jarak sebuah titik dari pusat Bima Sakti dinyatakan dengan  $r = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$ . Sedangkan sebuah titik di piringan ke pusat Bima Sakti dinyatakan dengan  $R = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ . Pada simulasi ini, digunakan parameter potensial yang mengacu pada model III dari pekerjaan (4) (lihat Tabel 2).

Tabel 2. Nilai untuk parameter potensial Bima Sakti yang digunakan.

Parameter	Nilai	Struktur Bima Sakti
Massa ( $M_b$ )	$443 \times 10 M_\odot$	Bulge
Skala panjang ( $a_1$ )	0.267 Kpc	
Skala tinggi ( $b_1$ )	0 Kpc	
Massa ( $M_d$ )	$2798 \times 10 M_\odot$	Piringan
Skala panjang ( $a_2$ )	4.40 Kpc	
Skala tinggi ( $b_2$ )	0.308 Kpc	
Massa ( $M_h$ )	$12474 \times 10 M_\odot$	Halo dark matter
Skala radius ( $a_3$ )	7.7 Kpc	

Integrasi orbit dilakukan dengan menggunakan modul *Galpy* (5) pada bahasa pemrograman Python. Integrator yang

digunakan adalah Runge-Kutta orde 4. Pada prinsipnya, integrator Runge-Kutta orde 4 memerlukan fungsi awal yaitu,  $y_{n+1} = f(t_{n+1}, y_{n+1}) = \Phi_{MW}$ . Integrasi orbit dilakukan selama 13 Gyr ke belakang dengan *timestep* (h) sebesar  $1 \times 10^{-3}$  Gyr. Kemudian nilai  $y_{n+1}$  untuk waktu  $t_{n+1} = t_n + h$  dapat dihitung sesuai persamaan (4). Dengan n dimulai dari 0 hingga jumlah integrasi yang dilakukan.

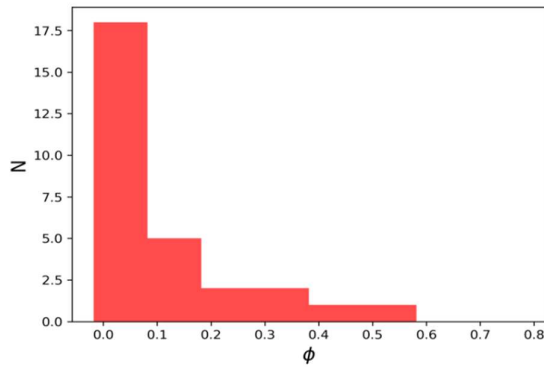
$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (4)$$

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa nilai  $y_0$  dalam perhitungan orbit ini merupakan kecepatan dan posisi satelit galaksi yang didapatkan dari berbagai referensi.

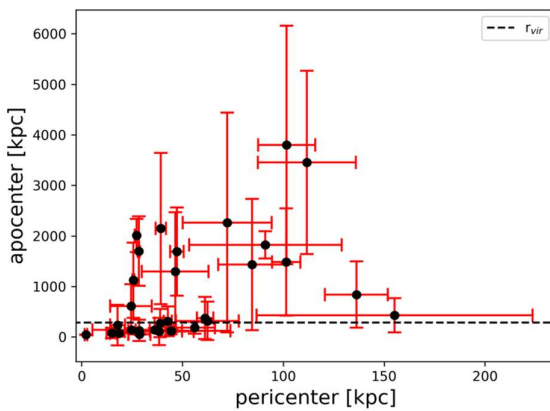
### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebagian besar satelit Bima Sakti terletak di daerah perigalaktik. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1. Parameter  $\phi = \frac{d_{GC} - d_{peri}}{d_{apo} - d_{peri}}$  menunjukkan fase pada tiap satelit Bima Sakti. Parameter  $d_{GC}$ ,  $d_{peri}$ , dan  $r_{apo}$  masing-masing adalah jarak satelit ke pusat Bima Sakti, perigalaktik, dan apogalaktik. Semakin kecil nilai  $\phi$ , maka satelit semakin dekat dengan perigalaktiknya. Satelit-satelit Bima Sakti yang sebagian besar terletak di daerah perigalaktik tentunya mengalami gaya pasang surut dari Bima Sakti yang lebih besar jika dibandingkan dengan satelit-satelit Bima Sakti yang berada di daerah apogalaktik.

Banyaknya satelit Bima Sakti yang berada di daerah perigalaktik juga menunjukkan adanya keterikatan gravitasi antara satelit-satelit tersebut dengan Bima Sakti. Hal ini tampak dari perigalaktik dan apogalaktik sebagian satelit yang masih berada di dalam radius virial Bima Sakti. Meskipun sebagian lainnya tampak berada di luar daerah radius virial Bima Sakti (lihat Gambar 2).



Gambar 1. Histogram distribusi satelit Bima Sakti. Jumlah satelit Bima Sakti tampak lebih banyak di daerah perigalaktik.



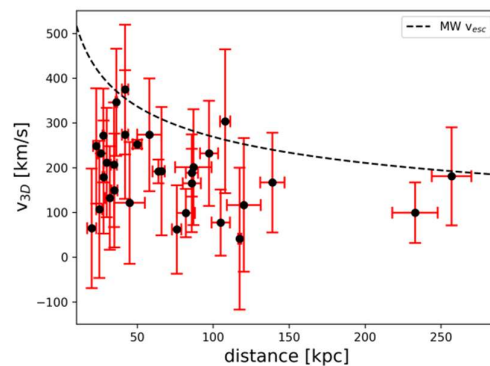
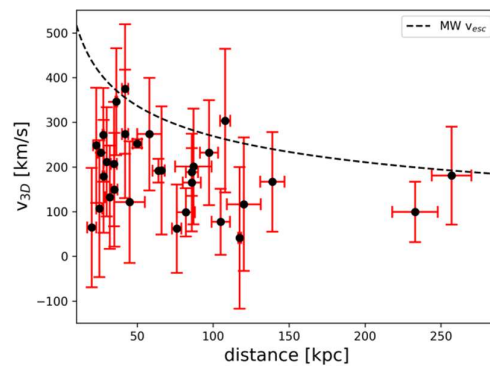
Gambar 2. Distribusi apogalaktik terhadap perigalaktik satelit-satelit Bima Sakti yang menunjukkan keterikatan gravitasi antara satelit dengan Bima Sakti. Garis putus-putus menunjukkan radius virial Bima Sakti.

Beberapa satelit Bima Sakti yang berada di perigalaktik diperkirakan sedang mengalami tidal disruption atau tidal stripping akibat pasang surut dari Bima Sakti. Menurut (12) dan (8), satelit galaksi dengan perigalaktik kurang dari 20 kpc yang akan mengalami *tidal stripping* paling besar. Pada Gambar 2, terdapat 4 satelit Bima Sakti yang diperkirakan mengalami *tidal stripping*, yaitu Sagittarius, Draco II, Tucana III, dan Segue 1. Tucana III adalah satelit Bima Sakti yang paling besar mengalami *tidal stripping* karena memiliki perigalaktik paling dekat. Hasil ini sesuai dengan yang didapatkan oleh (12) dan (8). Selain itu, (12) juga mendapatkan bahwa Triangulum II mengalami tidal stripping. Namun dalam pekerjaan ini, perigalaktik

Triangulum II ternyata lebih dari 20 kpc, sehingga tidak dikategorikan sedang mengalami *tidal stripping*.

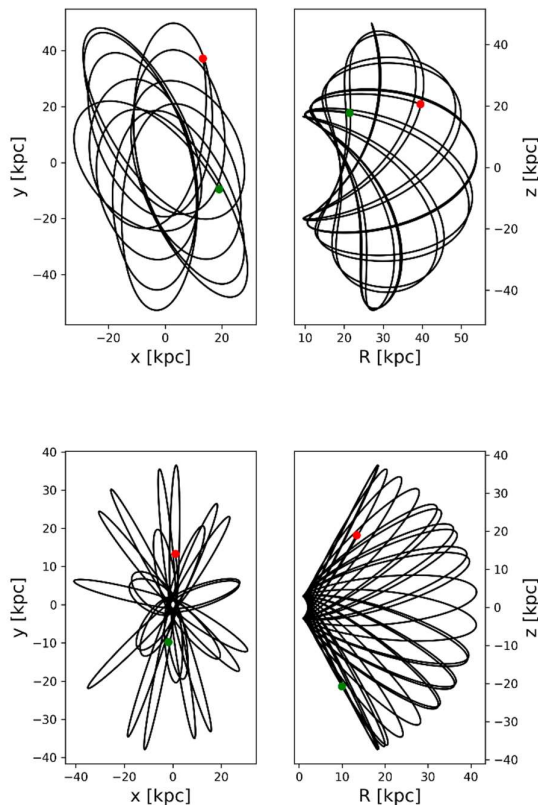
Perbedaan hasil pada pekerjaan ini dengan (12) dan (8) diakibatkan oleh perbedaan model Bima Sakti yang digunakan. Dalam pekerjaan ini, model Bima Sakti yang digunakan adalah model terbaru hasil *fitting* kurva rotasi Bima Sakti hingga mencapai jarak 200 kpc (4).

Sebagian satelit Bima Sakti yang berada di luar radius virial Bima Sakti tampaknya tidak terikat secara gravitasi dengan Bima Sakti. Namun, distribusi kecepatan 3D satelit-satelit tersebut menunjukkan bahwa semua satelit tersebut memiliki kecepatan yang masih berada di dalam rentang kecepatan lepas Bima Sakti. Meskipun beberapa di antara satelit tersebut memiliki kecepatan ruang yang lebih besar, namun rentang ketidakpastiannya masih berada dalam nilai kecepatan lepas Bima Sakti.



Gambar 3. Distribusi kecepatan 3D terhadap jarak untuk seluruh satelit-satelit galaksi. Garis putus-putus menunjukkan batas kecepatan lepas Bima Sakti sebagai fungsi jarak dari pusat Bima Sakti.

Kondisi saat apogalaktik dari satelit Bima Sakti berada di luar radius virial, namun kecepatan ruang satelit tersebut masih berada dalam rentang kecepatan lepas Bima Sakti, disebut sebagai *backslashing* (12) (8). Kondisi ini terjadi pada sebagian satelit, terutama Aquarius II dan Grus 1 yang terlihat terpisah dari kumpulan satelit lainnya. Dari analisis terhadap perigalaktik–apogalaktik dan kecepatan ruangnya terhadap kecepatan lepas Bima Sakti, dapat dikatakan bahwa semua satelit tersebut sebenarnya terikat secara gravitasi dengan Bima Sakti. Orbit beberapa satelit Bima Sakti dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Orbit Segue 1 (Atas) dan Tucana III (Bawah).

#### 4. Simpulan

Penelitian kali ini menunjukkan bahwa simulasi numerik dapat dilakukan untuk mempelajari dinamika benda di alam semesta. Salah satunya pergerakan satelit galaksi dalam potensial gravitasi Bima Sakti. Setelah dilakukan simulasi, didapatkan adanya

kemungkinan satelit-satelit Bima Sakti yang mengalami *tidal stripping*. Satelit tersebut adalah Sagittarius, Draco II, Tucana III, dan Segue 1. Sedangkan sebagian dari satelit-satelit Bimasakti mengalami *backslashing*. Secara umum, dapat dikatakan bahwa satelit-satelit ini memang terikat secara gravitasi dengan Bima Sakti.

Pekerjaan selanjutnya yang dapat dilakukan diantaranya adalah melakukan pengamatan pada satelit-satelit Bima Sakti yang mengalami *tidal stripping* untuk memastikan bahwa satelit-satelit tersebut memang benar mengalami *tidal stripping*. Simulasi N-benda untuk mempelajari bagaimana *tidal stripping* dapat terjadi pada satelit-satelit Bima Sakti juga menarik untuk dipelajari pada pekerjaan selanjutnya. Kemudian hasil simulasi ini dapat dicocokkan dengan data pengamatan yang ada, terutama katalog GAIA DR2 yang mengandung hampir 2,5 milyar bintang di dalamnya.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Jo Bovy dari Institute for Advanced Study, USA, yang telah terbuka berdiskusi dan memberikan saran mengenai penggunaan modul *Galpy* untuk melakukan integrasi orbit pada pekerjaan ini.

#### 6. Referensi

- [1] A. W. Mc Connachie. (2012). The Observed Properties of Dwarf Galaxies in and around the Local Group. *The Astronomical Journal*. 144: 4.
- [2] M. S. Pawlowski, dkk. (2015). The New Milky Way Satellites: Alignment with the VPOS and Predictions for Proper Motion and Velocity Dispersion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453: 1047.
- [3] Bajkova, A.T.& Bobylev, V.V. (2018). Refinement of Parameters of Six Selected Galactic Potential Models. *Open Astron.* 26: 72–79.
- [4] Bajkova, A. T., V. V. Bobylev. (2017). Galactic Orbits of Selected Companions of the Milky Way. *Astronomy Reports*. 61: 727-738.
- [5] Bovy, Jo. (2014). *Galpy: A python Library for Galactic Dynamics*. *The Astrophysical Journal*. 216: 29.

- [6] G., Battaglia, dkk. (2012). The Extensive Age Gradient of the Carina Dwarf Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 761: 6.
- [7] Caldwell, N. dkk. (2017). Crater 2: An Extremely Cold Dark Matter Halo. *The Astrophysical Journal*, 839: 20.
- [8] Fritz, T. K., dkk. (2018). Gaia DR2 Proper Motions of Dwarf Galaxies within 420 kpc: Orbits, Milky Way Mass, Tidal Influences, Planar Alignments, and Group Infall. *Astronomy & Astrophysics*.
- [9] Kallivayalil, N. dkk. (2018). The Missing Satellites of the Magellanic Clouds? Gaia Proper Motions of the Recently Discovered Ultra-faint Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 867: 19.
- [10] Koposov, S.E. dkk. (2015a). Beast of the Southern Wild: Discovery of Nine Ultra Faint Satellites in the Vicinity of the Large Magellanic Clouds. *The Astrophysical Journal*, 805: 130.
- [11] Sanders, J.L. dkk. (2018). Tidal disruption of dwarf spheroidal galaxies: the strange case of Crater II. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478: 3879.
- [12] Simon, J.D. (2018). Gaia Proper Motions and Orbits of the Ultra-faint Milky Way Satellites. *The Astrophysical Journal*, 863: 89.
- [13] Torrealba, G. dkk. (2016). At the survey limits: discovery of the Aquarius 2 dwarf galaxy in the VST ATLAS and the SDSS data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463: 712.
- [14] Walker, M.G. dkk. (2016). VizieR Online Data Catalog: Magellan/M2FS spectroscopy of Tucana 2 and Grus 1 (Walker+, 2016). *The Astrophysical Journal*, 819: 53.
- [15] Miyamoto, N. & Nagai, R. (1975). Three-dimensional Models for the Distribution of Mass in Galaxies. *Publications of Astronomical Society of Japan*. 27:533.
- [16] Navaro, J. F. dkk. (1997). A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering. *The Astrophysical Journal*. 490, 493.